

# Monte Carlo studija atmosferske prodornosti visokoenergijskih kozmičkih protona

---

**Bertok, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:587068>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-30**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U  
OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**IVAN BERTOK**

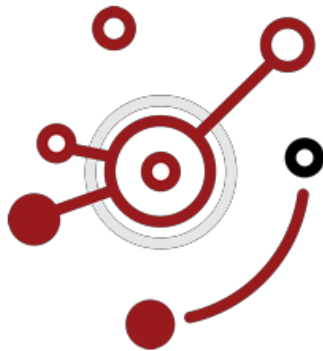
**Monte Carlo studija atmosferske prodornosti visokoenergijskih  
kozmičkih protona**

**Diplomski rad**

**Osijek, 2018.**

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U  
OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**IVAN BERTOK**

**Monte Carlo studija atmosferske prodornosti visokoenergijskih  
kozmičkih protona**

**Diplomski rad**

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku radi stjecanja  
akadenskog naziva **MAGISTRA EDUKACIJE FIZIKE I INFORMATIKE**

**Osijek, 2018.**

**"Ovaj diplomski rad izrađen je u Osijeku pod vodstvom doc. dr. sc. Darija Hrupeca kao mentora u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku"**

# Sadržaj

<b>1.</b>	UVOD.....	1
<b>2.</b>	KOZMIČKE ZRAKE.....	2
2.1.	Povijest i otkriće.....	2
2.2.	Kozmičke zrake i fotoni.....	3
2.3.	Sastav.....	4
2.4.	Čerenkovljevo zračenje.....	5
2.5.	Utjecaj na živa bića.....	7
<b>3.</b>	CORSIKA.....	8
<b>4.</b>	ZEMLJINA ATMOSFERA.....	9
4.1.	Od čega se sastoji?.....	10
4.2.	Slojevi.....	10
4.3.	Sudari proton-zrak.....	12
4.4.	Izotermni model.....	14
4.5.	U.S. Standard model.....	22
<b>5.</b>	USPOREDBA SIMULACIJSKIH I TEORIJSKIH VRIJEDNOSTI.....	24
<b>6.</b>	ZAKLJUČAK.....	26
<b>7.</b>	LITERATURA.....	27
<b>8.</b>	Životopis.....	32

# Monte Carlo studija atmosferske prodornosti visokoenergijskih kozmičkih protona

**IVAN BERTOK**

## **Sažetak**

U ovom diplomskom radu istražena je prodornost visokoenergijskih kozmičkih protona u atmosferu Zemlje. Pokriveno je energijsko područje od 10 GeV do 100 TeV, što je tipično područje koje pokrivaju Čerenkovljevi teleskopi. Opisane su kozmičke zrake, Zemljina atmosfera i programski paket CORSIKA, koji je korišten za Monte Carlo simulacije pljuskova koje u atmosferi iniciraju kozmički protoni. Rezultati simulacija uspoređeni su s teorijskim izračunom uz pomoć atmosferskog izotermnog modela. Određena je tipična visina prve interakcije kozmičkog protona u atmosferi za navedeno energijsko područje. Također su navedeni minimumi i maksimumi visina na kojima se događa prva interakcija proton-zrak.

(32 stranice, 20 slika, 20 literaturna navoda)

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku**

**Ključne riječi:** kozmičke zrake / atmosfera / CORSIKA / izotermni model / optička dubina

**Mentor:** doc. dr. sc. Dario Hrupec

**Ocjenjivači:** doc. dr. sc. Zvonko Glumac, predsjednik

doc. dr. sc. Dario Hrupec, mentor

doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj, članica

**Rad prihvaćen:** 30. svibnja 2018.

# Monte Carlo Study of the Atmospheric Penetration of High-Energy Cosmic Protons

IVAN BERTOK

## Abstract

In this graduate thesis, the penetration of high-energy cosmic protons in the Earth's atmosphere was studied. Energy domain from 10 GeV up to 100 TeV was covered, which is typical Cherenkov telescope detection domain. The cosmic rays, Earth's atmosphere and CORSIKA software package, used for Monte Carlo simulation of showers which are initiated by cosmic protons in the atmosphere, are described. The simulation results are compared with theoretical calculation using the atmospheric isothermal model. Typical first interaction height in the atmosphere for mentioned energy domain was determined. The minimum and maximum altitudes at which the first proton-air interaction occurs are also found.

(32 pages, 20 figures, 20 references)

**Thesis deposited in Department of Physics library**

**Keywords:** cosmic ray / the atmosphere / CORSIKA / the isothermal model / optical depth

**Supervisor:** Dario Hrupec, assistant professor

**Reviewers:** Zvonko Glumac, assistant professor

Dario Hrupec, assistant professor

Marina Poje Sovilj, assistant professor

**Thesis accepted:** May 30, 2018.

# 1. UVOD

Visokoenergijsko zračenje koje iz svemira putuje ka Zemlji je svakodnevno i bilo bi izrazito opasno po život ukoliko bi dolazilo do površine u takvom obliku. Ipak, naš planet obavića atmosferski omotač u kojemu se događaju interakcije kozmičkih zraka s česticama zraka, tako da čestice visoke energije najčešće ne prolaze u najniži sloj atmosfere. Koje su najniže nadmorske visine do koje takva jedna čestica može penetrirati u atmosferu, te može li se dogoditi da pogodi površinu Zemlje saznat ćemo u ovom radu.

Za simulacije upada visokoenergijskih kozmičkih protona u Zemljinu atmosferu korišten je programski paket CORSIKA. U ovisnosti o točno odabranim energijama, dobivene su visine na kojima se događa prva interakcija upadne čestice – protona i pojedine atomske jezgre u atmosferi (dušika ili kisika). Iz tih podataka, dobivena je Gaussova raspodijela ovisnosti visine o energiji. Pomoću atmosferskog izotermnog modela izračunate su visine prvih interakcija proton-zrak u ovisnosti o istim energijama, te su uspoređene s rezultatima dobivenih iz simulacija.

Ovo istraživanje je bitno radi utjecaja visokoenergijskih protona na živa bića i proširenja znanja vezanog za kozmičko zračenje koje svakodnevno pristiže ka Zemlji.



## 2. KOZMIČKE ZRAKE

Osim zvijezda, u svemiru postoje i drugi izvori zračenja. Najutjecajniji *termički izvor* zračenja za naš planet je Sunce, ali mi danas opažamo i druge, *netermičke izvore*. Pod pojmom termičkog zračenja podrazumijevamo proces termonuklearne fuzije vodika u helij uz emitiranje vidljive svjetlosti i topline, dok od netermičkih izvora opažamo različite tipove astročestica. Osim elektromagnetskog zračenja, gravitacijskih valova i astrofizičkih neutrina, svakodnevno detektiramo i *kozmičke zrake*.

Kozmičke zrake predstavljaju visokoenergijsko zračenje izvanzemaljskog podrijetla koje u atmosferu pristiže pretežito s velikih udaljenosti. U ovu vrstu danas ubrajamo isključivo nabijene čestice. Iako još uvijek ne možemo sa sigurnošću utvrditi porijeklo većinskog djela ovakvog zračenja, ipak možemo pretpostaviti da dio pristiže iz eksplozija i ostataka supernova. Još uvijek nije objašnjen uzrok zraka koje imaju energiju reda veličine  $10^{16}$ eV i više jer supernove nisu dovoljno velike kako bi producirale dovoljno ubrzanje za *ultravisokoenergijske čestice* (čestice s  $E > 10^{16}$ eV) [5]. Moguće je da su aktivne galaktičke jezgre i sudarajuće galaksije izvor ovakvih kozmičkih zraka. Povezanost s tamnom materijom ili nekom drugom egzotičnom pojavom također nije isključena [7]. *Primarne čestice* su izvorne zrake koje putuju međuzvezdanim prostorom, a *sekundarne čestice* su one koje nastaju interakcijama primarnih čestica s međuzvezdanim plinom [6].

### 2.1. Povijest i otkriće

Henri Becquerel godine 1896. otkriva radioaktivnost. U to vrijeme vjerovalo se da kozmičke zrake dolaze od zračenja radioaktivnih elemenata iz zemlje. Prve indikacije koje su se suprotstavljale tom uvjerenju nastaju 1910. godine, nakon što je Theodor Wulf pomoću svog *elektrometra* (uređaj za mjerenja stvaranja iona) dobio rezultate koji pokazuju povišeno zračenje na vrhu Eiffelovog tornja, s obzirom na zračenje u donjem sloju. Njegovi rezultati nisu bili široko prihvaćeni, tako da je takvo revolucionarno otkriće trebalo još dodatno potvrditi. Godine 1912. Victor Hess koristi tri poboljšana elektrometra na visini 5,3 km za mjerenje zračenja i zaključuje da čestice izrazito velike energije ulaze u atmosferu odozgo. Godine 1936. godine Hess dobiva Nobelovu nagradu iz fizike za svoje otkriće. Proučavanja

kozmičkih zraka ubrzo otvaraju vrata potpuno novom svijetu čestica. Tako je prva čestica antimaterije, pozitron, otkrivena 1932., zatim mion 1937., zatim pion i još neke.

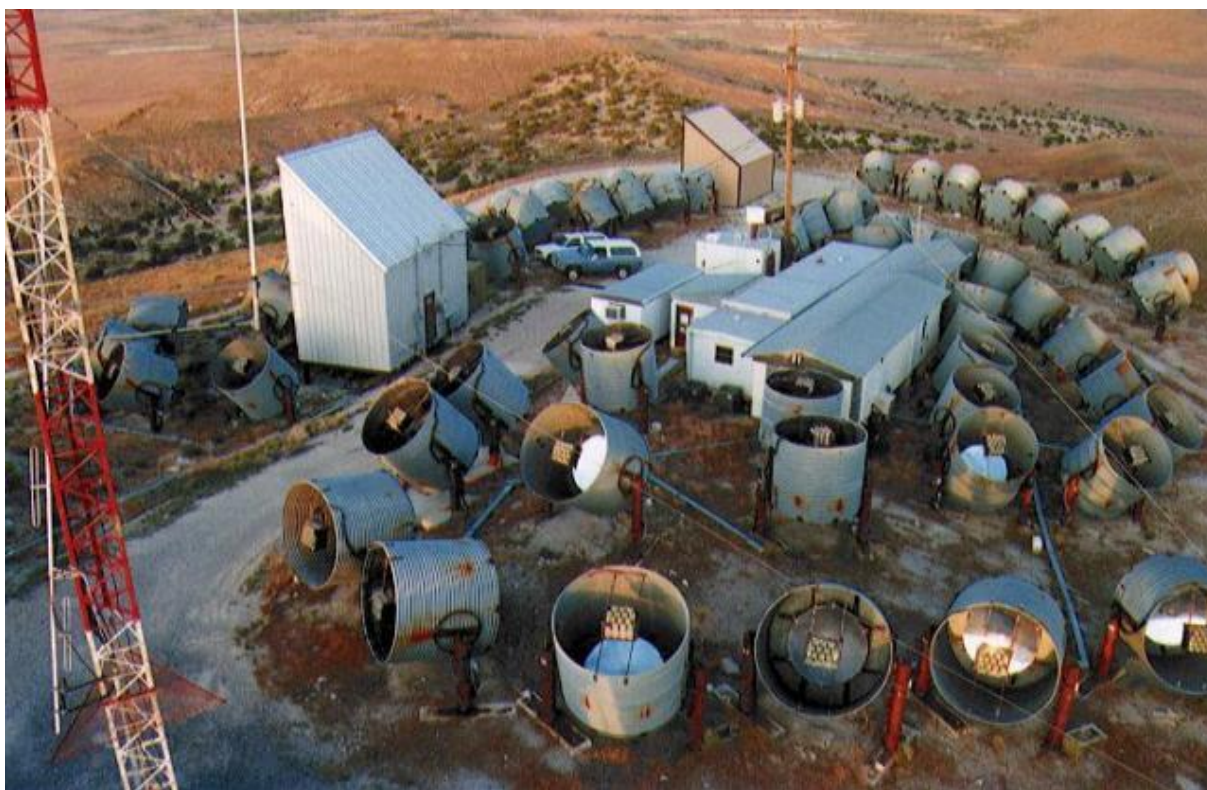


**Slika 2.1.** *Victor Hess u balonu prije mjerenja zračenja na visini 5,3 km [11]*

## 2.2. Kozmičke zrake i fotoni

Visokoenergijske čestice s masom, kozmičke zrake, različite su od elektromagnetnog zračenja tj. fotona, bezmasenih čestica koje prema iznosu energije dijelimo na gama-zrake i X-zrake. Osim mase, kozmičke zrake imaju veću energiju od energije fotona i električki su nabijene. Svi fotoni se gibaju jednakom brzinom, tako da energija fotona ovisi isključivo o frekvenciji. Kozmička zraka s najvišom energijom koja je ikada uočena, takozvana *Oh-My-God particle*, detektirana u Utahu 1991. pomoću detektora *Fly's Eye*. Imala je energiju  $E \approx 3 \times 10^{20}$  eV, i

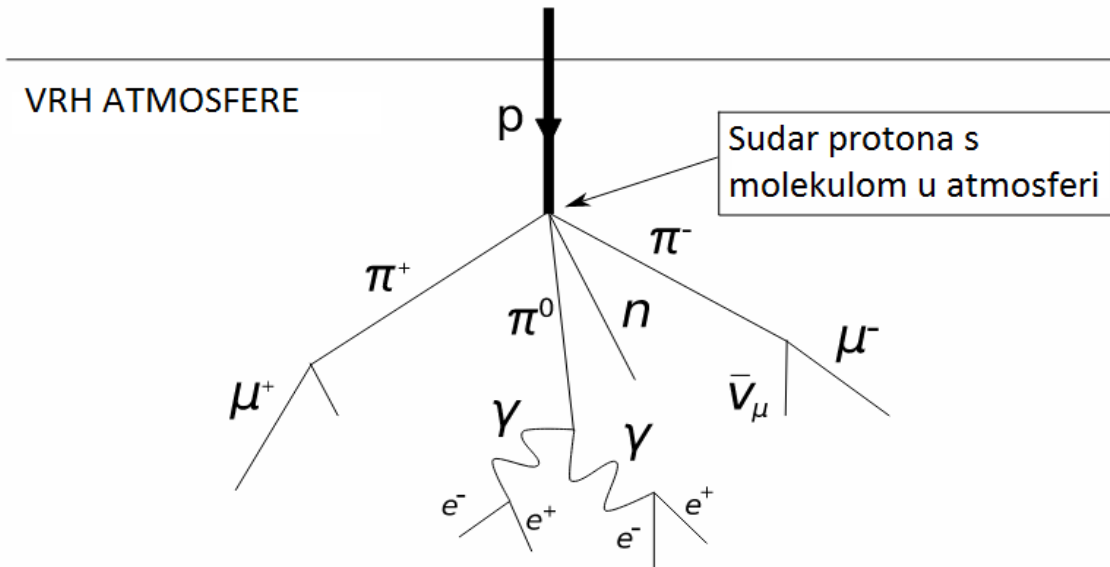
putovala je brzinom 0,999 brzine svjetlosti dok je gama-zraka najviše do sad opažene energije imala energiju  $E \approx 10^{14}$ eV [7].



**Slika 2.2.** *Fly'sEye* detektor u Utahu (15.10.1991.) [12]

### 2.3. Sastav

Od primarnih kozmičkih zraka, koje u Zemljinu atmosferu dolaze izvana, približno 99% su jezgre nama poznatih atoma, a oko 1% su elektroni. Oko 90% jezgara su protoni, tj. jezgre vodika, 9% su alfa-čestice, tj. jezgre helija, a svega 1% čine jezgre težih elemenata. U sekundarne čestice spadaju jezgre litija, berilija, bora i druge. Osim jezgara ovih atoma, kozmičkim zrakama pripadaju još: antiprotoni, pozitroni, neutroni, pioni i mioni. To su produkti sudara primarnih čestica s međuzvezdanim plinom, te kisikom i dušikom u atmosferi [6][8]. Nakon prve interakcije primarne čestice s kisikom ili dušikom u atmosferi, dolazi do stvaranja novih čestice, tj. nastaju *pljuskovi čestica*.

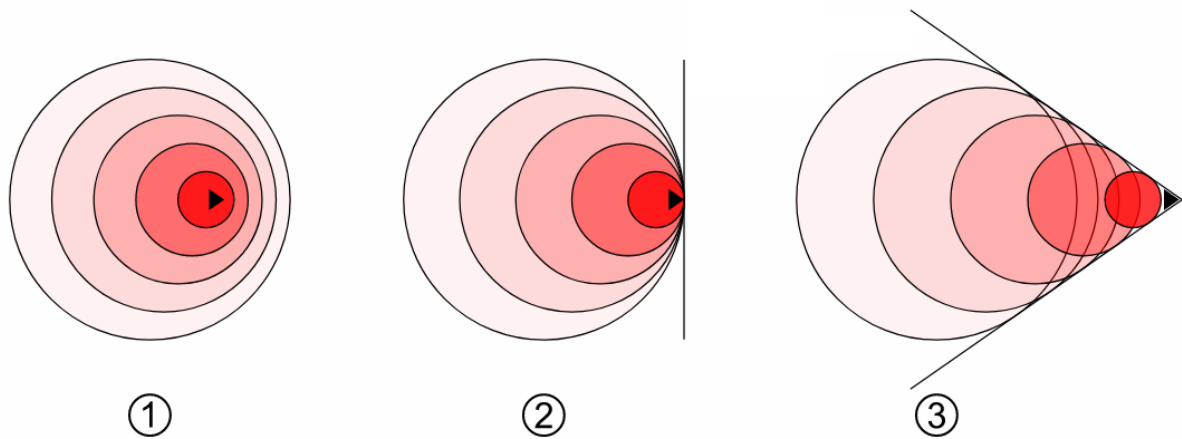


Slika 2.3. Sudar protona i molekule u atmosferi [13]

## 2.4. Čerenkovljevo zračenje

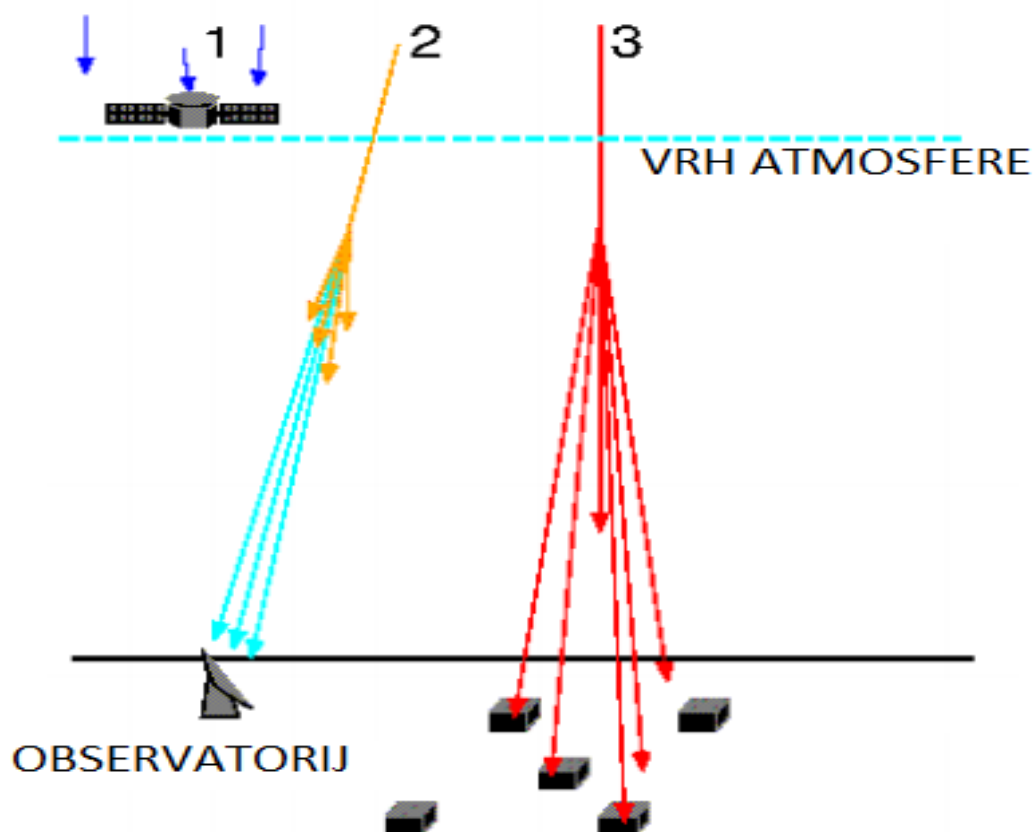
Nakon što visokoenergijske čestice penetriraju u atmosferu, na određenoj visini događa se sudar s česticom zraka, s jezgrom dušika ili kisika. Nakon sudara nastaju nove čestice koje često imaju brzinu veću od brzine svjetlosti u zraku (ali ne i od brzine svjetlosti u vakuumu), takozvane *ultrarelativističke* čestice (elektroni i pozitroni). Kako je to moguće? Kada svjetlost putuje u vakuumu, ima maksimalnu brzinu, ali kada se giba u sredstvu (zrak) iznos brzine nešto je manji. Između tog intervala iznosa brzine svjetlosti u vakuumu i zraku, nalaze se brzine ultrarelativističkih čestica. Ovakvo ponašanje rezultira fenomenom koji nam ujedno omogućuje detekciju kozmičkih zraka, *Čerenkovljevim zračenjem*.

Čerenkovljevo zračenje ima učinak vrlo sličan *probijanju zvučnog zida*. Zamislimo neki izvor zvuka koji s obzirom na slušatelja miruje, a zatim se giba sve većom i većom brzinom dok ne prestigne brzinu zvuka. U tom trenutku dolazi do probijanja zvučnog zida, tj. novonastale valne fronte se sijeku s ranije nastalim frontama. Oblikuje se tzv. *Machov stožac*.



**Slika 2.4.** (1) Sabijanje valnih fronti u smjeru gibanja izvora zvuka, (2) Izvor doseže brzinu zvuka, (3) izvor premašuje brzinu zvuka i nastaje Machov stožac [14]

U pljuskovima čestica, elektroni i pozitroni koji imaju veću brzinu od brzine svjetlosti u sredstvu, stvaraju val elektromagnetske prirode. Prema ruskom fizičaru Pavelu Čerenkovu, koji je otkrio ovu pojavu, ovakav val nazivamo *Čerenkovljevom svjetlošću*. Ovakva svjetlost vidljiva je ultraljubičasta svjetlost posebnih karakteristika i uz pomoć nje opažamo kozmičko zračenje [4].



**Slika 2.5.** *Detekcija kozmičkih zraka: 1. Kozmičke zrake niskih energija detektiraju uređaji u satelitu. 2. Kozmičke zrake nešto viših energija generiraju manji pljusak čestica. Čerenkovljevo zračenje koje pljusak emitira, opaža veliki teleskop na površini Zemlje. 3. Kozmičke zrake još većih energija generiraju velike pljuskove čestica koje putuju do površine, a bivaju zabilježene dodatnom opremom detektora. [15]*

## 2.5. Utjecaj na živa bića

Većina kozmičkih zraka u nekom višem sloju atmosfere (oko 20 km od razine mora) sudarit će se s česticom u zraku, nastat će druge čestice manjih energija koje će putovati dalje prema površini Zemlje. Međutim, to neće uvijek biti tako. U određenom manjem postotku, prve interakcije će se događati i na puno manjim visinama, iz čega možemo zaključiti da što se nalazimo na većoj visini, tj. u višem sloju atmosfere, bit ćemo izloženiji udarima kozmičkih zraka. Ako se nađemo izvan atmosferskog omotača (npr. kao astronauti), izloženost ovakvim zrakama bit će još puno veća i moguće je da će tisuće zraka prolaziti kroz naša tijela svake sekunde. Što to znači? Imaju li one ikakvog utjecaja na nas ukoliko im se nađemo na putu?

Ako se dogodi da nas takva jedna visokoenergijska kozmička zraka pogodi, moguća su dva slučaja. U većini slučajeva, ona će proći kroz nas kao da se ništa nije dogodilo. Razlog tome je struktura atoma, mala jezgra s obzirom na elektronski omotač, što znači da se atom (samim time i naša tijela) većinskim djelom sastoji od praznog prostora. Međutim, nećemo uvijek biti te sreće. U manjem broju slučajeva, kozmička zraka pogađa jezgru atoma, dolazi do interakcije. Nadolazeća čestica oslobađa dio energije, a u očnim jabučicama pogođene osobe može doći do pojave manjeg bljeska, što se naziva *vizualni fenomen kozmičkih zraka*. Sudar može imati štetne utjecaje na tijelo, jer često oštećuje DNA u stanicama što može dovesti do razvoja tumora ili drugih promjena koje će loše utjecati na zdravlje živog bića. Sudar jedne takve visokoenergijske čestice s DNA, može prekinuti dio lanca. U većinskom dijelu slučajeva, takve stanice će odumrijeti, ali ponekad dolazi i do reprodukcije i razvoja malignih stanica.

### 3. CORSIKA

*CORSIKA (Cosmic Ray Simulations for Cascade)* Monte Carlov je simulacijski paket programa za detaljno proučavanje evolucije proširenih pljusкова čestica u atmosferi koji su inicirani visokoenergijskom kozmičkom zrakom ili drugom kozmičkom zrakom visoke energije. Prva verzija puštena je u upotrebu u listopadu 1989. i više puta je unaprijeđena do današnjeg dana [1].

Pljuskovu česticu koja se događaju u atmosferi inicirani su fotonima, elektronima, protonima, jezgrama ili bilo kojim drugim česticama, a pomoću programa CORSIKA imamo mogućnost očitavanja nekih bitnih svojstava tih događaja. To su: nadmorska visina, vrsta čestica, energija, lokacija, putanja i vrijeme gibanja sekundarnih čestica koje nastaju pri interakciji upadne čestice sa atmosferom [2]. Prvotna zadaća programa bila je performansa simulacija u eksperimentu KASKADA, koji je služio za proučavanje prvotnog sastava i energijskog spektra kozmičkih zraka [3]. S godinama, CORSIKA je nadograđivana i danas je alat koji se koristi za mnoge teleskope i detektore čestica visokih energija. Energiju primarne čestice možemo podesiti od par GeV do tipično  $E_0 \approx 10^{12} \text{eV}$  za eksperimente Čerenkovljev teleskop, pa sve do najvećih opaženih energija koje iznose  $E > 10^{20} \text{eV}$  [2]. Svi poznati procesi koji bi mogli utjecati na vrijednosti varijabli koje promatramo pri simulacijama proširenih pljusкова čestica,

implementirani su u samom programu kako bi se dobili što precizniji rezultati s obzirom na razinu našeg trenutnog znanja. Ovo se odnosi na interakcije upadnih čestica s medijem – zrakom. Sve sekundarne čestice praćene su eksplicitno po njihovim putanjama i prema njihovim parametrima, te snimljene od trenutka kada se nađu na razini koju promatramo. Ovo nam omogućuje detaljnu analizu svih značajki simuliranih pljuskova [2].

Najveći problem kod programa za ovakve simulacije je ekstrapolacija interakcija na visokim energijama i na udaljenostima koje nisu pokrivena eksperimentalnim podacima. Ovakve podatke za sad ne možemo dobiti pomoću uređaja za sudaranje čestica, jer prije nego čestice postignu ovakve energije, nestaju iz nama vidljive domene (uređaj bi trebao biti veći od akceleratora u CERN-u kako bi postigli takve energije). Upravo ove čestice od najvećeg su značaja u području ovakvih pljuskova čestica, jer iz njih nastaju sekundarne čestice najviših energija koje donose najšire energijske frakcije nakon sudara s česticama duboko u atmosferi. Iz tog se razloga za sada oslanjamo na podatke koji proizlaze iz ekstrapolacije temeljene na trenutnim teorijskim modelima [2].

## **4. ZEMLJINA ATMOSFERA**

Omotač koji se nalazi oko našeg planeta i ne dozvoljava svim česticama prolazak do površine, a samim time i čuva život na Zemlji, zovemo *Zemljina atmosfera*. Činjenica da je davno postojala bez kisika, ujedno objašnjava zašto se život u ovakvom obliku kao što je danas nije mogao razviti prije. Trebalo je proći nekoliko bilijuna godina da bi nastala atmosfera koja omogućava tijek evolucije koji vodi k nastanku čovjeka. U tim davnim vremenima, zrak se sastojao od ugljikovog dioksida, metana i dušika. U reakcijama sunčevih zraka s molekulama u atmosferi, nastajalo je nešto kisika, međutim zbog njegovog lakog vezanja za druge elemente, nije se zadržavao kao slobodna molekula. Zemlja je bila veliki usisivač kisika. Prve vidljive tragove kisik je otisnuo prije približno tri bilijuna godina, a zapisi su pronađeni u kamenu (oksidacija). Nedugo zatim, neki mikroorganizmi razvijaju sposobnost fotosinteze. Podizanjem razine oceana, dio tih organizama završava u vodi gdje kisik ne može reagirati s ugljikom kao što se to događa na tlu i slobodne molekule kisika se napokon zadržavaju u oceanu i u zraku. Narednih nekoliko stotina milijuna godina kisik se jedva održavao kao slobodna molekula u



atmosferi, a Zemljin usisavač postajao je sve slabiji. Vulkani koji su svojim reakcijama vezali većinski dio kisika iz zraka, postaju sve pasivniji. Planet se hladi, a sve više kisika obogaćuje atmosferu. Slični procesi nestajanja i nastajanja slobodnog kisika se nastavljaju do današnjeg dana.

#### 4.1. Od čega se sastoji?

Zemljina atmosfera se sastoji od nekoliko vrsta plinova. Većinski dio pripada dušiku, 78% ukupnog volumena. Slijede kisik s 21% volumena, a ostalih 1% pripada vodenoj pari, ugljičnom dioksidu, ozonu i još nekim elementima u tragovima. Iako u vrlo malom postotku, vodena para i ozon vrlo su važni za održavanje ravnoteže života na Zemlji. Ciklički proces vode i zaštita od zračenja koju nam daje ozon, igraju ključnu ulogu za opstanak bogate raznolikosti živih organizama.

#### 4.2. Slojevi

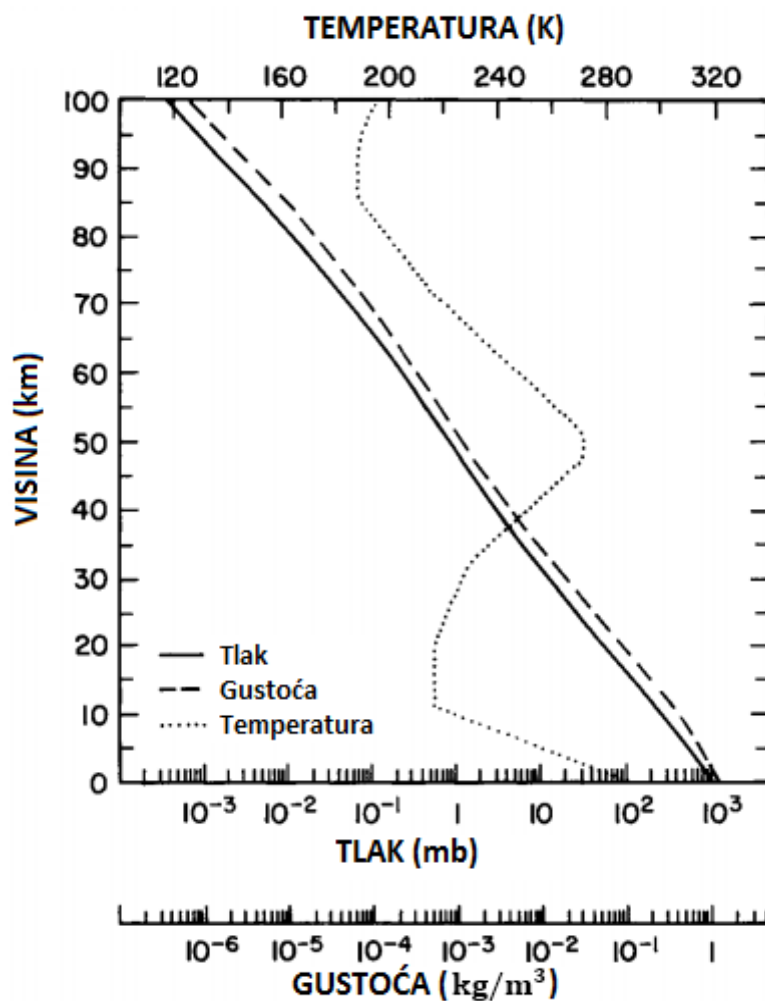
Zemljinu atmosferu dijelimo na četiri osnovna sloja koja štite naš planet od štetnog zračenja i omogućavaju nam život. To su: *termosfera* (85-600 km iznad razine mora), *mezosfera* (50-85 km), *stratosfera* (16-50 km) i *troposfera* (0-16 km) [9]. Ako se popnemo na visinu  $h > 600$  km, ulazimo u tzv. *kritičan nivo, egzosferu*, sloj koji je toliko rijedak da molekule iz njega često napuste atmosferu i odlaze u svemir bez da su se ijednom sudarile s nekom drugom molekulom [10].

Termosfera - najizloženiji dio zračenju, u kojemu se zbog apsorpcije Sunčevog zračenja, molekule koje se nalaze u njemu (kisik i dušik), razbijaju se na atome, zrak se zagrijava i temperatura je najveća u najgornjem djelu, a gledajući prema dolje, ona se smanjuje.

Mezosfera – dio atmosfere u kojemu se nalaze najviši oblaci. Isto tako, ovo je najhladnije mjesto na Zemlji s temperaturom i do  $-90^{\circ}\text{C}$ . S obzirom na to da je zrak u ovom sloju vrlo rijedak i nema puno molekula koje apsorbiraju Sunčevo zračenje, viši dio mezosfere ujedno je i hladniji dio. U najnižem području ovog sloja, nalaze se molekule ozona koje upijaju ultraljubičasto zračenje, pa je temperatura viša.

Stratosfera, sloj koji se nalazi ispod mezosfere, obiluje neuobičajenim molekulama kisika –  $O_3$  tj. ozonom. Njegovo upijanje ultraljubičastog zračenja zagrijava stratosferu, a kako su gornji dijelovi izloženiji, temperatura opada s visinom.

Promjena temperature najnižem djelu - troposferi, suprotna je u odnosu na stratosferu. Naime, u ovom najnižem atmosferskom sloju, temperatura se smanjuje s povećanjem visine. Površina planeta upija Sunčevo zračenje, a zauzvat grije troposferu odozdo prema gore. Osim temperature zraka, gustoća i tlak također se smanjuju u tom smjeru. Većina vodene pare i čestica prašine nalaze se u ovom djelu atmosfere, tako da tu nalazimo najveći dio oblaka. Isto tako, masa atmosfere je daleko najveća u troposferi, 90% od ukupne mase svih slojeva [11].

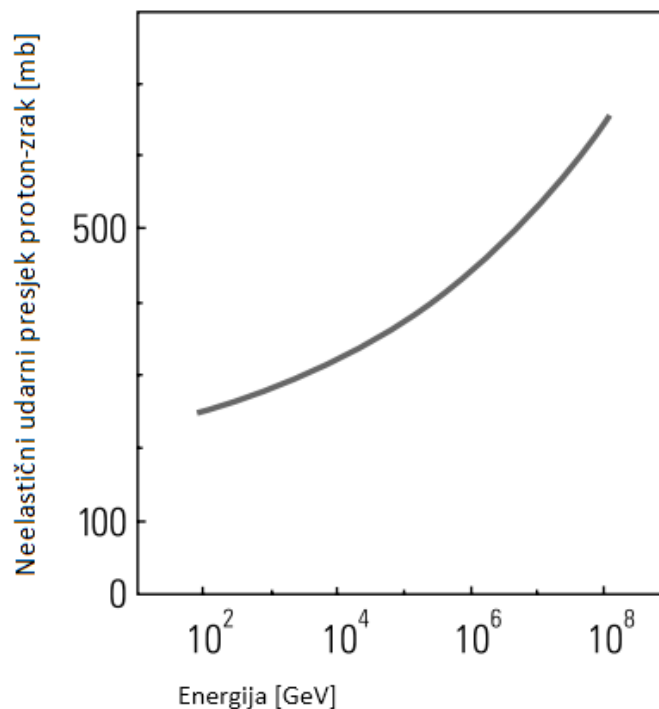


**Slika 4.1.** Opći pregled ovisnosti tlaka, gustoće i temperature o visini: U.S. Standard Atmosphere (1976) [10].

### 4.3. Sudari proton-zrak

Primarne čestice koje nam omogućavaju prikupljanje informacija u astrofizici su atomske jezgre, fotoni i neutroni. Astročestice koje u atmosferu Zemlje dolaze u najvećem broju su protoni (oko 90% od svog upadnog kozmičkog zračenja). U ovom radu baviti ćemo se interakcijama upravo tih čestica s atomskim jezgrama kisika i dušika.

Nakon ulaska u atmosferu, dolazi do interakcije visokoenergijskih protona sa zrakom, stoga nam je *udarni presjek* takvih sudara od velike važnosti. Pod pojam udarnog presjeka podrazumijevamo efektivnu površinu u kojoj se događaju sudari *projektil-čestica* (one koje pristižu iz izvanzemljskog prostora) i *cilj-čestica* (čestice koje se već nalaze u toj površini). Za cilj-česticu koristim atom dušika, jer je zastupljenost ovakvih atoma u zraku približno 78%. Ovisnost ovog udarnog presjeka o energiji protona prikazan je na slici 4.2. Za energiju 100 GeV, udarni presjek proton-zrak iznosi oko 250 mb (milibarn<sup>1</sup>), što možemo očitati sa navedene slike.



**Slika 4.2.** Udarni presjek za interakciju proton-zrak [16]

<sup>1</sup>Barn – mjerna jedinica za udarni presjek koja predstavlja površinu. 1 barn =  $10^{-27}$  m<sup>2</sup>

Za udarni presjek, pri energiji 100 GeV, *optička dubina* atmosfere, pri kojoj se događa sudar protona s dušikom iznosi:

$$\lambda = \frac{A}{N_A \sigma_A} \approx 93 \text{ g/cm}^2, \quad (4.1)$$

pri čemu je

- $1 \text{ mb} = 10^{-27} \text{ cm}^2$
- $\lambda$  – optička dubina atmosfere
- $A$  – atomska masa cilj-čestice ( $A = 14$  za atom dušika)
- $N_A$  – Avogadrova konstanta
- $\sigma_A$  – udarni presjek.

Poznata vertikalna optička dubina atmosfere na srednjoj razini mora, dobivena iz

$$\lambda(h) = \int_h^\infty \rho(h') dh', \quad (4.2)$$

iznosi:  $\lambda(h) = 1034 \text{ g/cm}^2$

pri čemu je

- $h$  - visina (uzimamo  $h = 0$  za donju granicu)
- $\rho(h)$  – gustoća zraka

Iz izraza (4.2), vidljivo je da optička dubina atmosfere opada s visinom, iz čega možemo zaključiti da će se za dobiveni rezultat optičke dubine atmosfere u (4.1), interakcija proton-zrak dogoditi u gornjem dijelu atmosfere.

Poznato je da atmosfera s visinom mijenja karakteristike, a jedna od promjena je vertikalna optička dubina. Najznačajnije promjene u optičkoj dubini događaju se u prvih nekoliko kilometara gledajući od prosječne razine mora prema gore. Na ovu komponentu također utječu doba dana i godine. Modeli koji se koriste za preciznije izračune, moraju uzeti u obzir ovakve varijacije. Model kojim ćemo se koristiti kako bismo dobili rezultate za optičku dubinu s obzirom na različite energije upadnog protona, reproducirat će rezultate uzevši u obzir gore navedene uvijete. Najbitniji početni uvjet koju uzimamo u obzir je temperatura zraka na srednjoj razini mora.

#### 4.4. Izotermni model

Masena gustoća zraka kao funkcija visine jedna je od osnovnih stvari koje promatramo kako bismo kreirali atmosferski profil pomoću kojega ćemo moći odrediti vertikalnu optičku dubinu. Gustoća zraka se znatno mijenja s obzirom na visinsku udaljenost od razine mora, pa je tako na razini od 100 km čak šest puta rjeđa nego na nultoj nadmorskoj visini, a između 100 km i 300 km još se prorijedi šest puta. Druga bitna komponenta koju trebamo uzeti u obzir je molarna masa zraka, za koju na visini  $0 \leq h \leq 90$  km uzimamo konstantnu vrijednost  $M_m = 28,966 \text{ g mol}^{-1}$  (prosječna molarna masa 78,084 % N, 20,946 % O, 0,934 % Ar i oko 0,036 % drugih elemenata) a iznad 90 km postaje manja.

Model koji uzima u obzir molarnu masu i pomoću kojeg možemo opisati promjenu optičke dubine u ovisnosti o visini je takozvani *izotermni model*. U ovom modelu, zrak je aproksimiran kao idealan plin s univerzalnom temperaturom  $T$ . Izraz koji se koristi za izračunavanje vertikalne optičke dubine kao funkcije visine je:

$$\lambda(h) = \lambda_0 e^{-gM_m h/RT} \quad (4.3)$$

pri čemu je

- $R$  - univerzalna plinska konstanta
- $g$  – ubrzanje Zemljine sile teže
- $M_m$  – molarna masa zraka
- $\lambda_0$  – optička vertikalna gustoća na razini mora
- $T$  – temperatura na razini mora (prosječna temperatura na Kanarskim otocima je  $15^\circ\text{C}$  i tu vrijednost koristit ćemo za potrebe računa pomoću ovoga modela)

Teorijska vrijednost za  $\lambda_0$  dobivena je iz gustoće  $\rho_0$  pomoću izraza

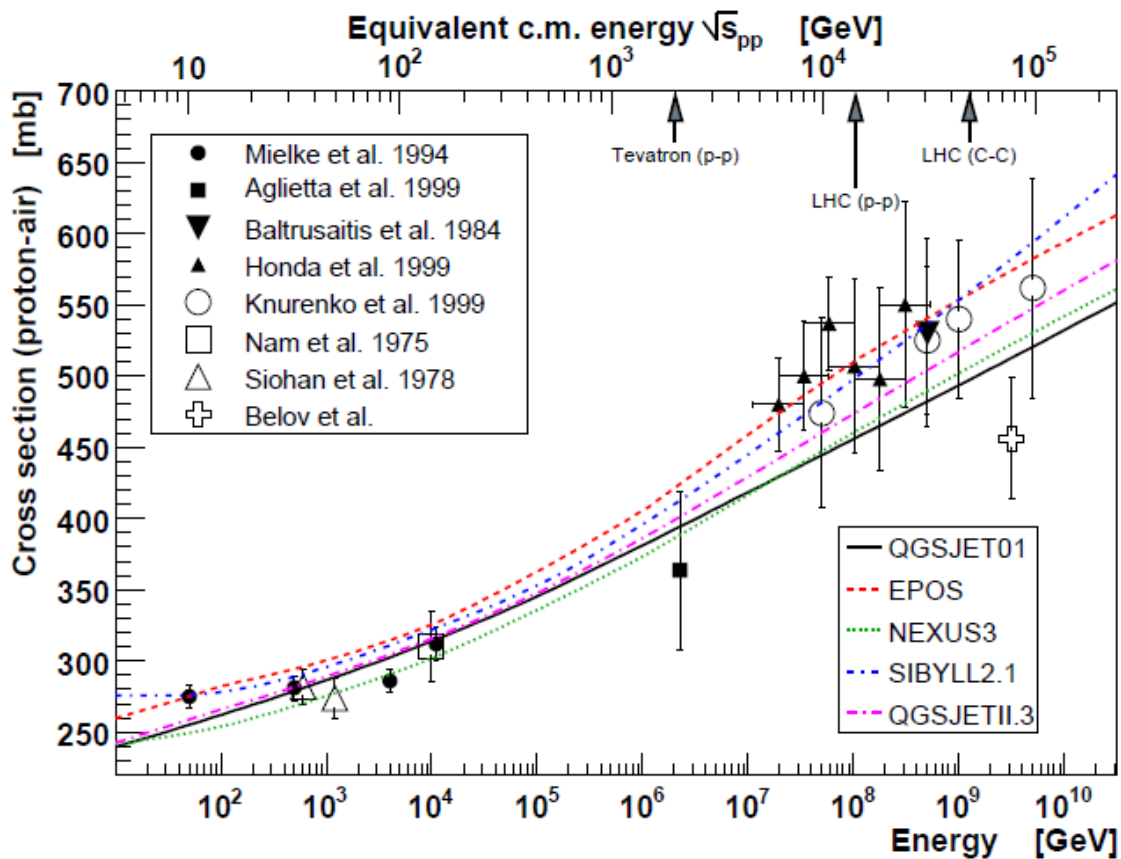
$$\lambda_0 = \rho_0 RT / gM_m, \quad (4.4)$$

dok iz jednadžbe (4.2) slijedi

$$\rho(h) = -d\lambda(h)/h.$$

Prilikom računanja, za udarni presjek očitavam vrijednosti eksperimentalno dobivenih podataka (Slika 4.4.) u ovisnosti o energiji koja nas zanima (energije za koje sam u programu CORSIKA već dobio visine na kojima dolazi do prve interakcije proton-zrak). Iz udarnog

presjeka sam izračunao optičku dubinu pomoću formule (4.1), te pomoću tih podataka teorijsku vrijednost za visinu na kojoj se događa prva interakcija protona sa zrakom. Slijedi usporedba eksperimentalno dobivenih visina u programu CORSIKA i teorijski dobivenih podataka za visinu.



**Slika 4.4.** Udarni presjek proton-zrak u ovisnosti o energiji (iz eksperimentalno dobivenih podataka za pljuskove čestice u atmosferi) [17]

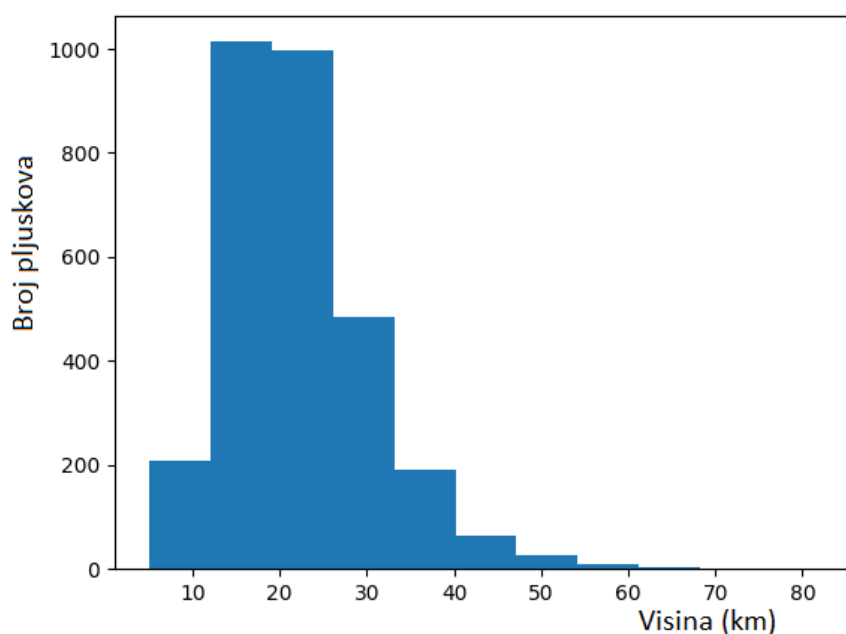
Krivulja s koje iščitavam podatke za udarni presjek sa slike 4.4. je QGSJET01, kako bi model bio usklađen s onim koji sam koristio u programu CORSIKA pri radu sa simulacijama pljuskova čestica u atmosferi.

U tablici 1. prikazani su podaci dobiveni vlastitim simulacijama u programu CORSIKA na uzorku od 3000 pljuskova.

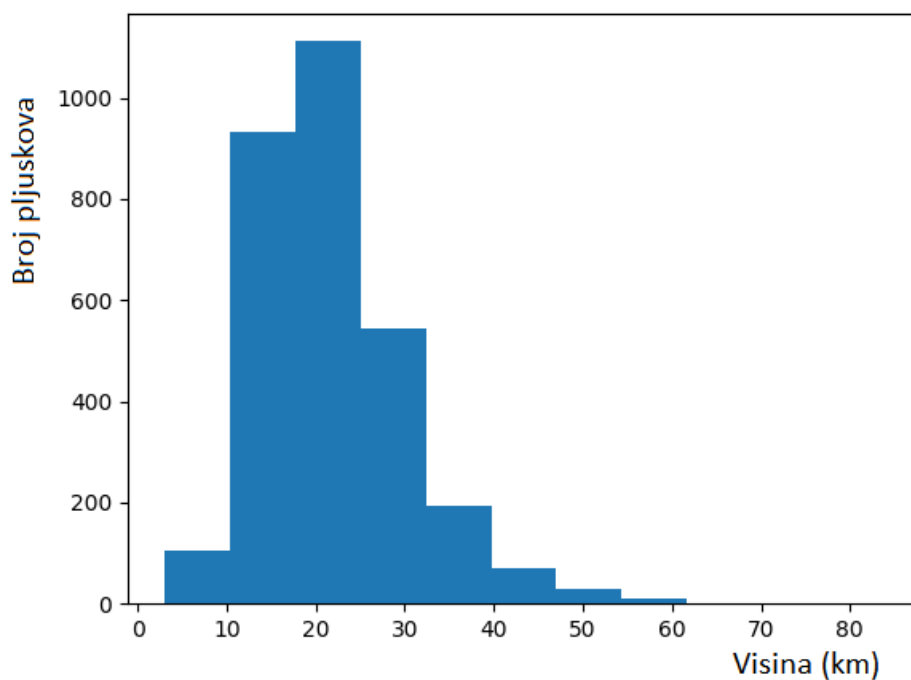
**Tablica 1.**

Energija upadne čestice (proton) $E$ [GeV]	Prosječna visina na kojoj se događa prva interakcija $\bar{h}$ [km]	Maksimalna visina na kojoj se dogodi interakcija $h_{max}$ [km]	Minimalna visina na kojoj se dogodi interakcija $h_{min}$ [km]	Standardna devijacija $\delta$ [km]
10	22,03	4,93	82,43	8,33
50	21,87	2,96	83,79	8,55
80	21,85	4,86	74,63	8,61
90	20,94	2,36	74,62	8,79
100	20,67	2,91	82,95	8,50
120	20,71	1,56	70,93	8,55
1 000	21,24	3,01	89,71	8,44
10 000	21,83	1,91	77,15	8,43
100 000	22,70	2,83	74,96	8,98

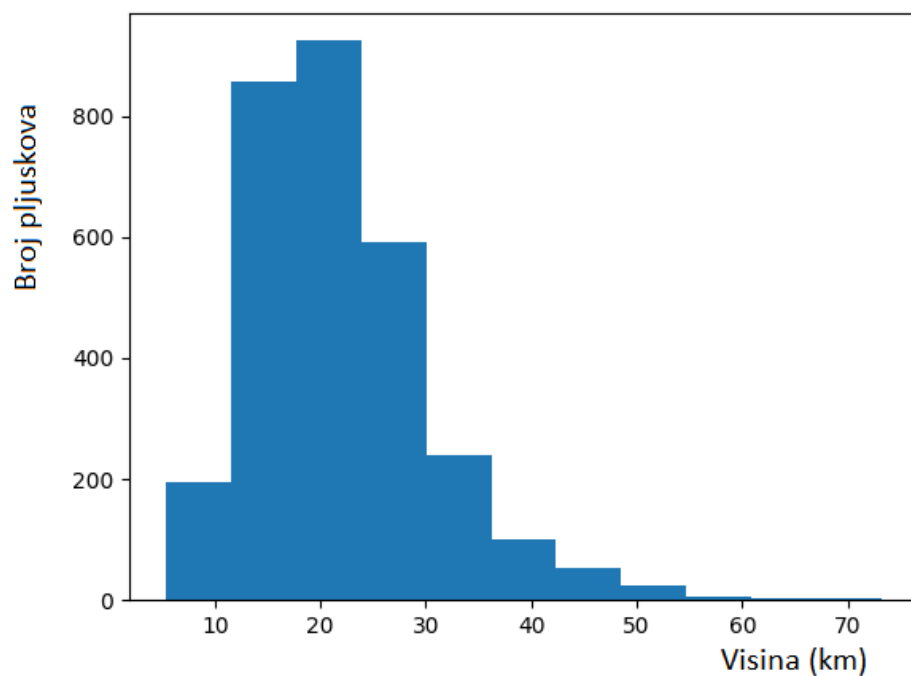
U nastavku se nalazi grafički prikaz nadmorskih visina dobivenih u programu CORSIKA u ovisnosti o točno određenim energijama upadne kozmičke zrake (protona).



**Slika 4.5.** 3000 pljuskova (iniciranih kozmičkim protonom energije 10 GeV) po visinama na kojima se događa prva interakcija ( $h = 22,03 \pm 8,33$  km)

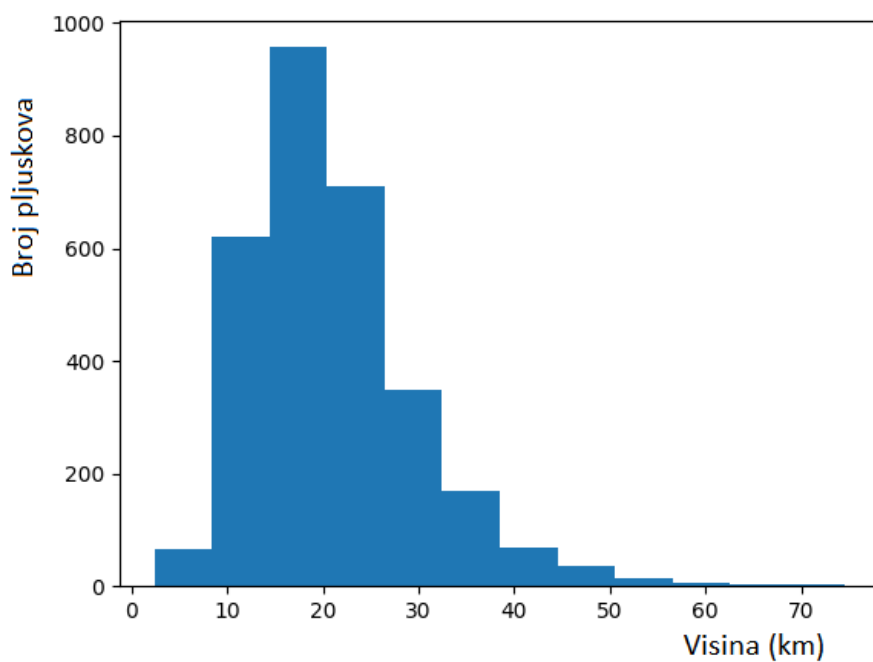


**Slika 4.6.** 3000 pljuskova (iniciranih kozmičkim protonom energije 50 GeV) po visinama na kojima se događa prva interakcija ( $h = 21,87 \pm 8,55$  km)

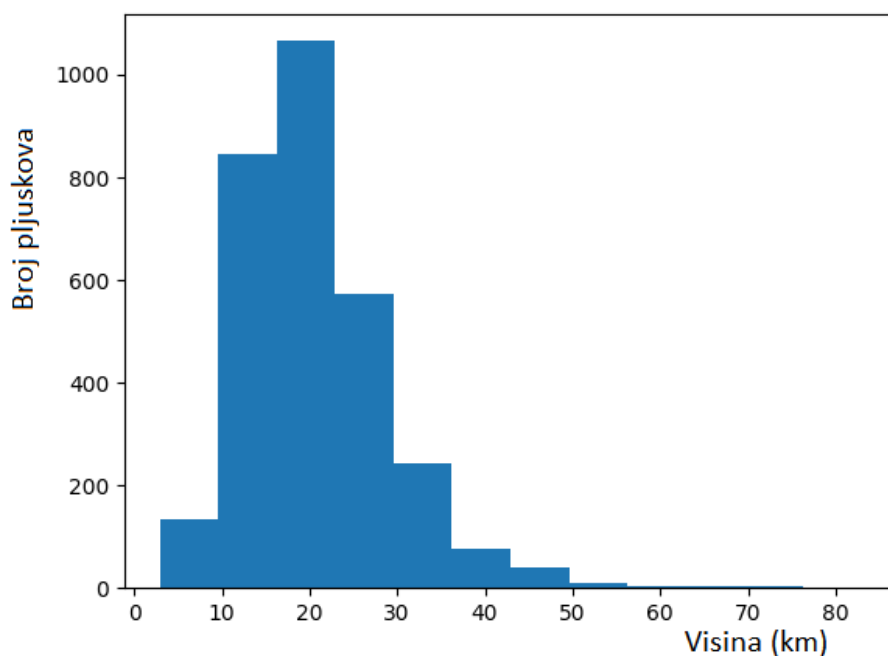


**Slika 4.7.** 3000 pljuskova (iniciranih kozmičkim protonom energije 80 GeV) po visinama na kojima se događa prva interakcija ( $h = 21,85 \pm 8,61$  km)

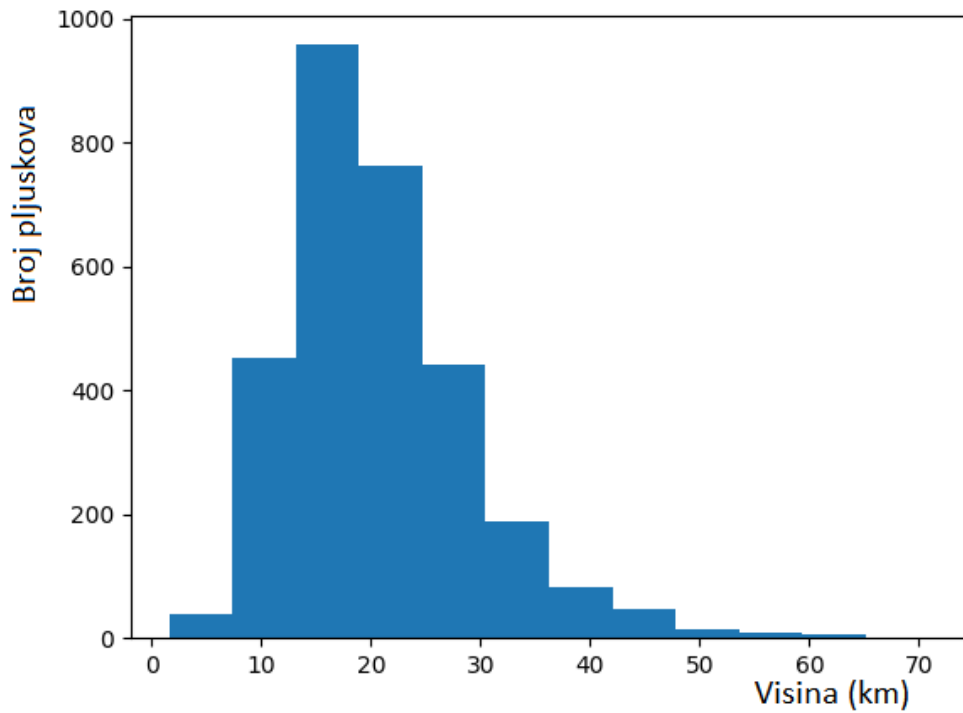




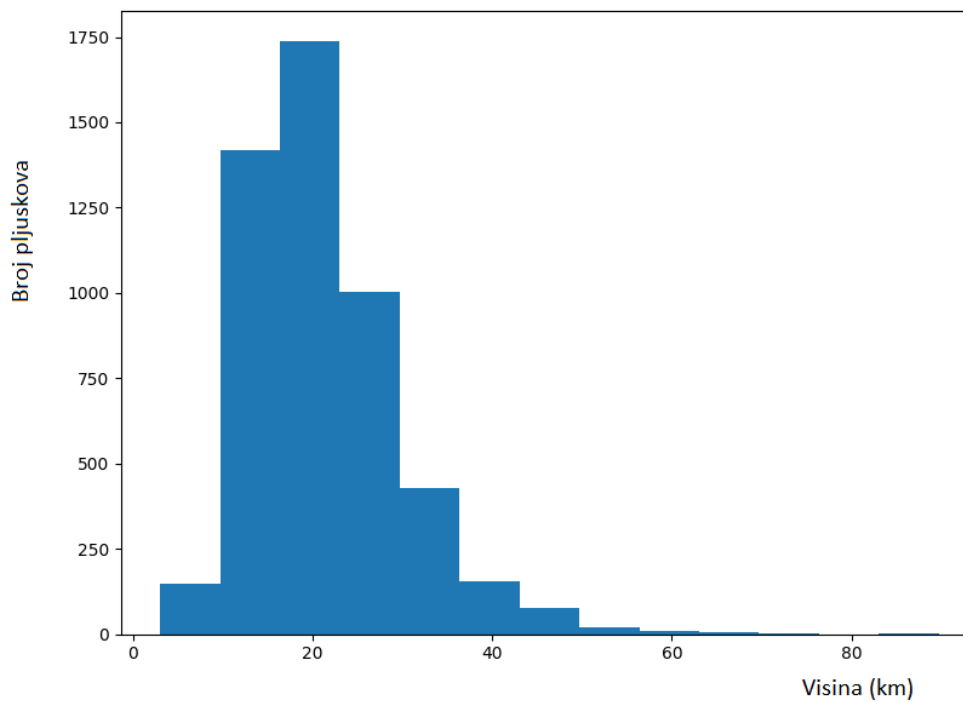
**Slika 4.8.** 3000 pljuskova (iniciranih kozmičkim protonom energije 90 GeV) po visinama na kojima se događa prva interakcija ( $h = 20,94 \pm 8,79$  km)



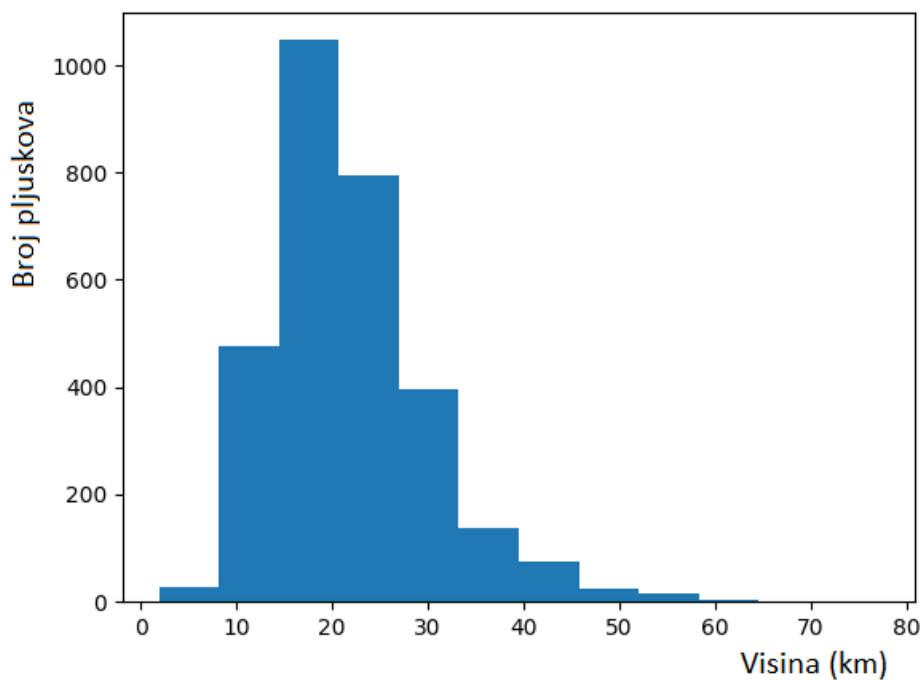
**Slika 4.9.** 3000 pljuskova (iniciranih kozmičkim protonom energije 100 GeV) po visinama na kojima se događa prva interakcija ( $h = 20,67 \pm 8,50$  km)



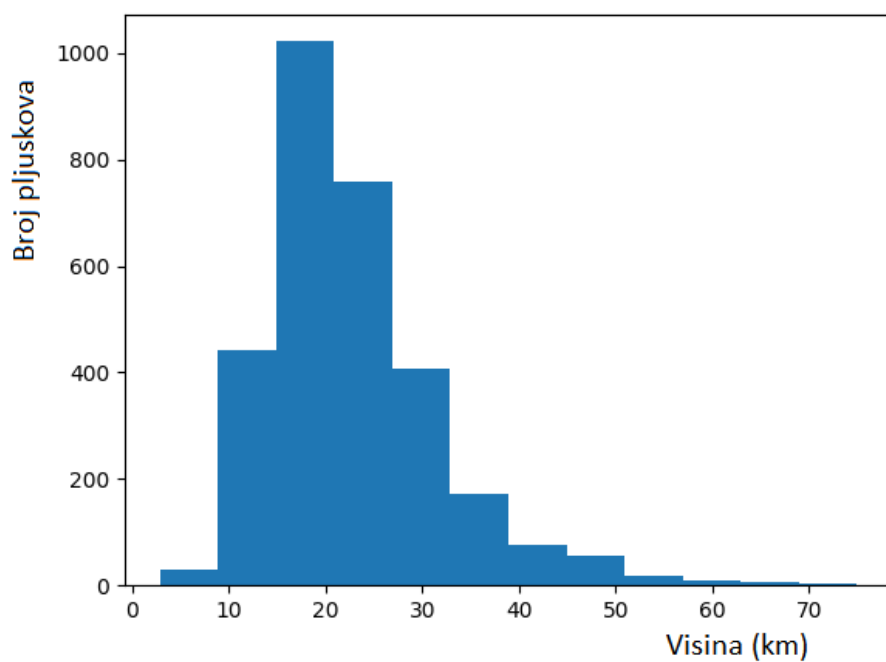
**Slika 4.10.** 3000 pljuskova (iniciranih kozmičkim protonom energije 120 GeV) po visinama na kojima se događa prva interakcija ( $h = 20,71 \pm 8,55$  km)



**Slika 4.11.** 3000 pljuskova (iniciranih kozmičkim protonom energije 1 TeV) po visinama na kojima se događa prva interakcija ( $h = 21,24 \pm 8,44$  km)

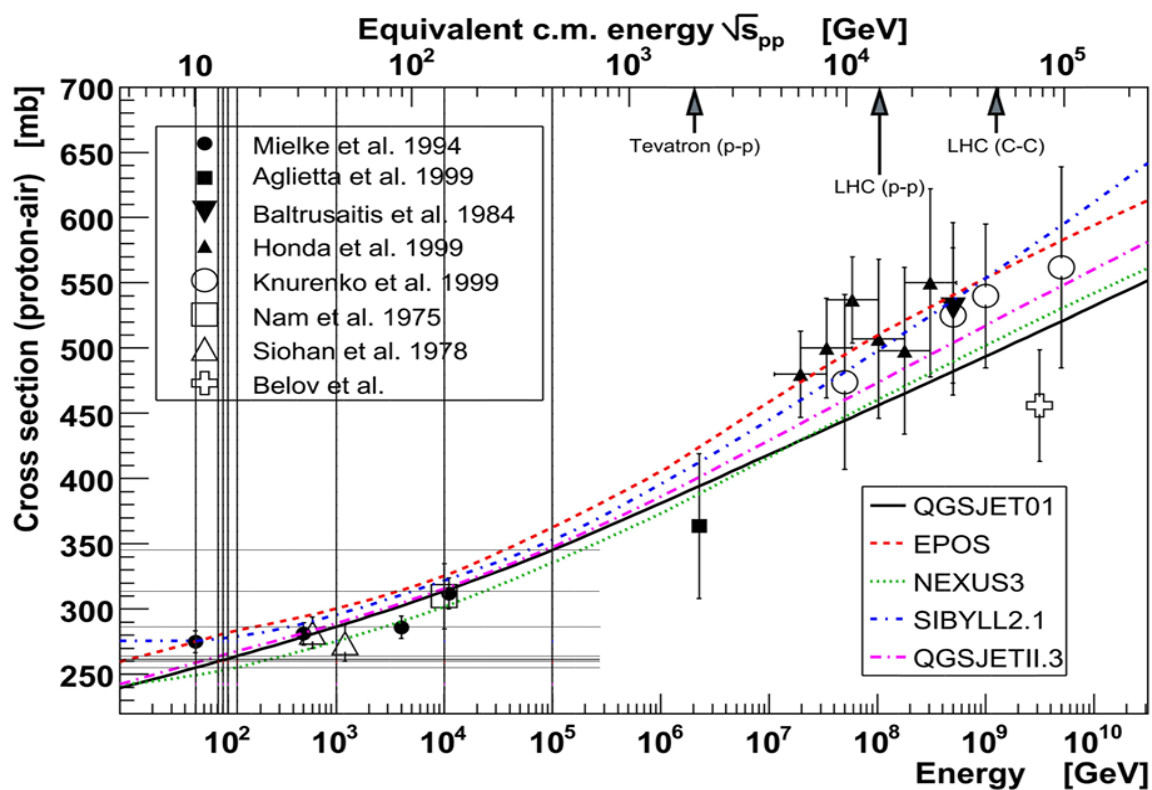


**Slika 4.12.** 3000 pljuskova (iniciranih kozmičkim protonom energije 10 TeV) po visinama na kojima se događa prva interakcija ( $h = 21,83 \pm 8,43$  km)



**Slika 4.13.** 3000 pljuskova (iniciranih kozmičkim protonom energije 100 TeV) po visinama na kojima se događa prva interakcija ( $h = 22,70 \pm 8,98$  km)

Na slici 4.14. prikazani su sjecišta pravaca energije iz tablice 1. i udarnih presjeka u ovisnosti o tim energijama.



Slika 4.14. Udarni presjek proton-zrak u ovisnosti o energiji (sjecišta)

U tablici 2. nalazi se numerički prikaz sjecišta pravaca energija-udarni presjek i izračun za vertikalnu optičku dubinu iz izraza (4.1), te za visinu iz (4.3).

Tablica 2.

Energija upadne čestice (proton) $E$ [GeV]	Udarni presjek $\sigma_A$ [mb]	Vertikalna optička dubina $\lambda$ [g/cm <sup>2</sup> ]	Visina na kojoj se događa interakcija $h$ [km]
10	240,0	96,87	19,96
50	254,6	91,31	20,46
80	259,5	89,59	20,62
90	260,6	89,21	20,66
100	261,4	88,94	20,59
120	263,6	88,19	20,66
1 000	286,0	81,29	21,44

10 000	313,2	74,46	22,18
100 000	345,0	67,38	23,02

#### 4.5. U.S. Standard model

U programu CORSIKA, koristi se nešto detaljniji i kompliciraniji model, takozvani *US Standard Atmosphere (USStdA 1976)*. Ovaj idealizirani model temelji se na mjerenjima podataka na srednjim visinama različitih slojeva atmosfere. Ovo možemo predočiti i slikovito: zamislimo tortu koja ima nekoliko katova (npr. biskvit, krema, biskvit, krema, žele). Svakom katu odredimo središnju visinu i za svaku središnju visinu tražimo isti tip podatka. Pomoću ove aproksimacije možemo tražiti podatke o optičkoj gustoći u ovisnosti za različite visine uzimajući u obzir već prije definirane karakteristike za određeni interval visine atmosfere. Tablice USSuDA 1976 temeljene su na prosjecima tih mjerenja, stoga se mogu koristiti kao srednje vrijednosne karakteristike atmosfere.

USSuDA 1976 predstavlja atmosferu u obliku slojeva koji se nižu jedan na drugog od razine mora sve do 1 000 km [24]. Svaki od slojeva opisan je varijablama: tlak, temperatura, gustoća, kemijski sastav i dr. Jedna od bitnijih karakteristika koja razlikuje ovaj model od izotermnog modela promjena je temperature s obzirom na visinu.

Vertikalna optička dubina atmosfere aproksimirana je za svaki izotermni sloj atmosfere funkcijom:

$$\lambda(h) = a + b e^{-\frac{h}{c}} \quad (4.5)$$

pri čemu su

- $a, b, c$  – poznati parametri

tako da je  $\lambda$  kontinuirana funkcija od  $h$ .

*Linsley model* nam daje poznate parametre u ovisnosti o visini na kojoj želimo izračunati optičku dubinu.

**Tablica 3.** Iznosi parametara 5 atmosferskih slojeva (*Linsley model*) [18]

Layer	Layer limits	$a_l$	$b_l$	$c_l$
$l$	$h_{l-1}$ [km] $h_l$ [km]	[g cm <sup>-2</sup> ]	[g cm <sup>-2</sup> ]	[m]
1	0            4	-186.5562	1222.6562	9941.8638
2	4            10	-94.9199	1144.9069	8781.5355
3	10           40	0.61289	1305.5948	6361.4304
4	40           100	0.0	540.1778	7721.7016
5	100          112.8	0.01128292	1.0	10000000

Kako bi model bio potpun, koristi se:

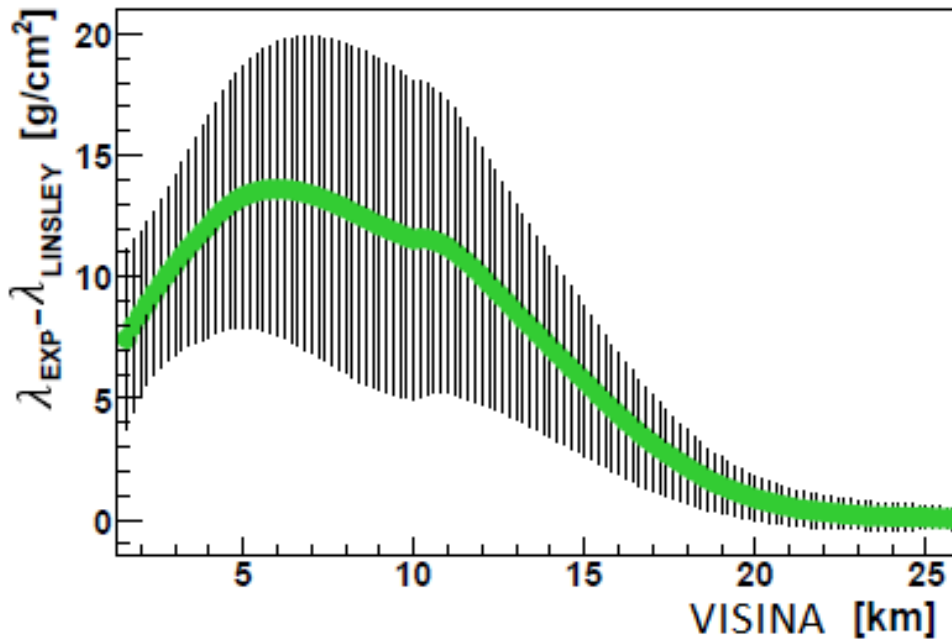
$$\lambda(h) = \begin{cases} a_l - b_l e^{-\frac{h}{c_l}}, & h_{l-1} \leq h < h_l, \quad (l = 1, \dots, L-1) \\ a_L - b_L \frac{h}{c_L}, & h_{l-1} \leq h < h_l \\ 0 & h \geq h_L \end{cases} \quad (4.6)$$

pri čemu su

- $a_l, b_l, c_l, l = 1, \dots, L$  poznati parametri
- visine  $h_0, \dots, h_l$  definiraju granice slojeva, koje moraju potvrđivati da je  $h_l < h_{l+1}$  za svaki  $l$

Služeći se tablicom 2. i jednadžbom (4.6), *Linsley Model of 5 layers* daje vrlo preciznu karakterizaciju 5 slojeva atmosfere, sve do  $h_{max} \approx 112,8$  km. Ta visina ujedno predstavlja kraj profila s  $\lambda(h_{max}) = 0$  g/cm<sup>2</sup>. Za visine veće od 90 km, Linsley profil je nešto neprecizniji, nego za manje visine, ali je optička dubina na takvim visinama približno 0,001 g/cm<sup>2</sup> i nema značajnijeg utjecaja na izračune koji proizlaze iz pljuska čestica [18]. Međutim, činjenica je da su temperatura, gustoća i tlak varijable, stoga ne možemo pričati o konstantnim vrijednostima optičke dubine u ovisnosti o visini proton-zrak interakcije. Unatoč tome, možemo koristiti prosječne vrijednosti tih varijabli.

Poznati eksperimentalni rezultati ovisnosti udarnog presjeka o visini (*Linsley Model*), prikazani su na slici 4.14.



Slika 4.14. Grafički prikaz ovisnosti udarnog presjeka o visini (Lisney Model) [18]

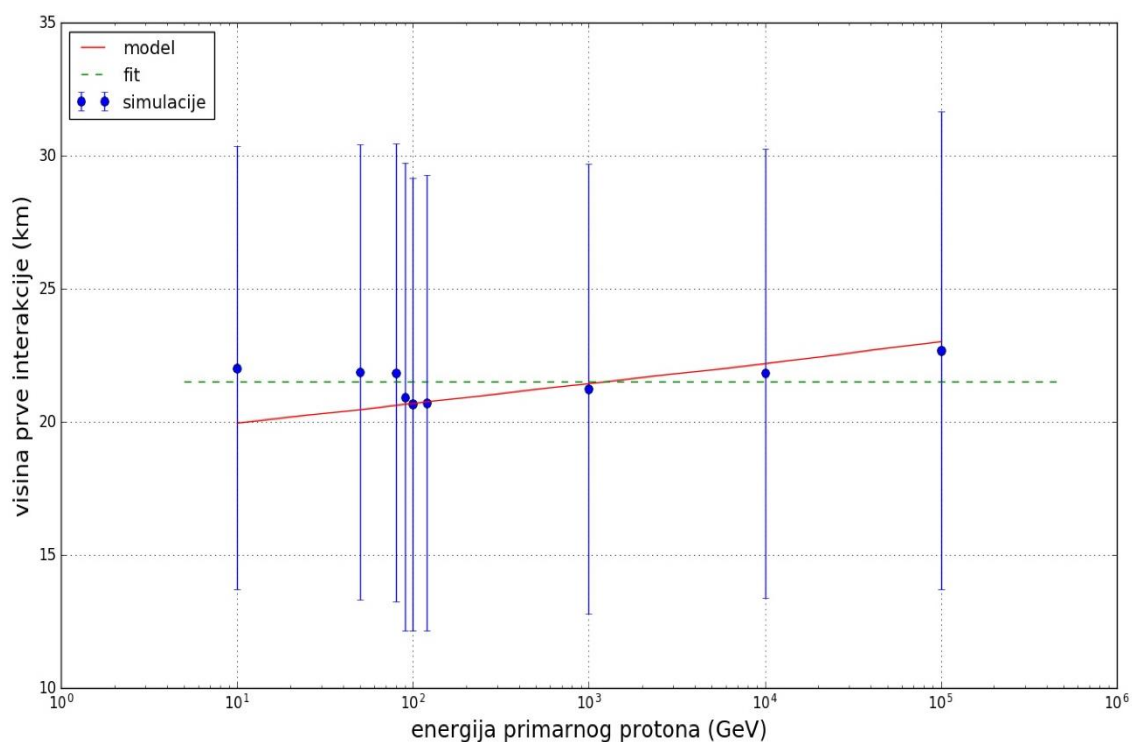
## 5. USPOREDBA SIMULACIJSKIH I TEORIJSKIH VRIJEDNOSTI

Za usporedbu simulacijskih i teorijskih vrijednosti koristimo rezultate koje smo dobili pomoću simulacija u programu CORSIKA, te računске vrijednosti dobivene iz izotermnog modela atmosfere.

**Tablica 3.** Usporedba simulacijskih i teorijskih vrijednosti visina prve interakcije kozmičkog protona u atmosferi

Energija upadne čestice (proton) $E$ [GeV]	Visina na kojoj se događa prva interakcija (simulacije) $h_{simulacija}$ [km]	Teorijske vrijednosti visina (izotermni model) $h_{teorija}$ [km]
10	$22,03 \pm 8,33$	19,96
50	$21,87 \pm 8,55$	20,46
80	$21,85 \pm 8,61$	20,62
90	$20,94 \pm 8,79$	20,66

100	$20,67 \pm 8,50$	20,59
120	$20,71 \pm 8,55$	20,66
1 000	$21,24 \pm 8,44$	21,44
10 000	$21,83 \pm 8,43$	22,18
100 000	$22,70 \pm 8,98$	23,02



**Slika 5.1.** Prikaz visina prve interakcije primarnog protona u ovisnosti o energijama primarnog protona. Točke predstavljaju podatke dobivene Monte Carlo simulacijama. Puna crvena crta je teorijska krivulja, a zelena crtkana krivulja je prilagodba linearne funkcije na podatke dobivene simulacijama



## 6. ZAKLJUČAK

Nakon provedenog istraživanja visina prve interakcije primarnog kozmičkog protona u Zemljinoj atmosferi, u energijskom intervalu od 10 GeV do 100 TeV, možemo zaključiti sljedeće:

1. Primarni kozmički proton, u energijskom intervalu od 10 GeV do 100 TeV, stupa u prvu interakciju s atomskom jezgrom dušika ili kisika na prosječnoj visini od 22 km.
2. Širina raspodjele slučajnih vrijednosti prve interakcije dosta je velika. Iznosi oko 8 km.
3. Repovi raspodjele idu dosta daleko tako da smo pronašli protone koji su ušli u interakciju već na 90 km visine. S druge strane, pojedini protoni uspjeli su proći cijelu atmosferu do nadmorske visine od 2 km.
4. S obzirom da se opservatorij na La Palmi nalazi na visinama od 2200 m do 2400 m (a onaj na Havajima na visini iznad 4000 m) postoji nezanemariva vjerojatnost da nas izravno pogodi primarna kozmička zraka!
5. Teorija predviđa lagani porast visine prve interakcije u intervalu od 10 GeV do 100 TeV, dok su rezultati simulacija više u skladu s vodoravnim pravcem tj. ne pokazuju ovisnost visine prve interakcije o energiji. To može biti posljedica aproksimacija (previše grubog modela atmosfere) ili posljedica nekih neadekvatno postavljenih ulaznih parametara u simulacijama.

## 7. LITERATURA

1. D. Heckand T. Pierog, Extensive air shower simulation with CORSIKA (Version 7.6400): A Users Guide, **1**, 2018.  
<<https://web.ikp.kit.edu/corsika/usersguide/usersguide.pdf>>
2. D. Heckland, J. Knapp, J.N. Capdeville, G. Schatz, T. Thouw, CORSIKA: A Monte Carlo code to Simulate Extensive Air Showers, **1, 2** 1998.  
<[https://web.ikp.kit.edu/corsika/physics\\_description/corsika\\_phys.pdf](https://web.ikp.kit.edu/corsika/physics_description/corsika_phys.pdf)>
3. Gaurang B. Yodh, The Knee: Theory and Experiment, **7**, 2006. <[http://www.cosmic-ray.org/conf/papers/001\\_cosmic2005.pdf](http://www.cosmic-ray.org/conf/papers/001_cosmic2005.pdf)>
4. D. Hrupec, Kako opažamo visokoenergijske kozmičke gama-zrake  
<<http://lapp.irb.hr/~dhrupec/writing/Kako%20opazamo%20game.pdf>> , **1**
5. <<http://www.telescopearray.org/index.php/about/what-are-cosmic-rays>>
6. <<http://pdg.lbl.gov/2017/reviews/rpp2017-rev-cosmic-rays.pdf>>, **1**
7. <<https://www.universetoday.com/86490/astronomy-without-a-telescope-oh-my-god-particles/>>
8. <[https://web.archive.org/web/20121028154200/http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know\\_11/cosmic\\_rays.html](https://web.archive.org/web/20121028154200/http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_11/cosmic_rays.html)>
9. <[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/science/mos-upper-atmosphere.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/mos-upper-atmosphere.html)>
10. Murry L. Salby, Fundamentals of Atmospheric Physics, 1996.  
<<http://users.df.uba.ar/llamedo/compartido/Salby.pdf>>, **9, 10, 13**
11. <<https://www.nytimes.com/2012/08/07/science/space/when-victor-hess-discovered-cosmic-rays-in-a-hydrogen-balloon.html>>
12. <<https://timeline.web.cern.ch/timelines/Cosmic-rays/overlay#1991-10-15%2011:00:00>>
13. <[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Atmospheric\\_Collision.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Atmospheric_Collision.svg)>
14. <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Sound\\_barrier\\_chart.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Sound_barrier_chart.svg)>
15. <<https://web.archive.org/web/20120712052716/http://www.nsl.msu.edu/files/PAN%200cosmic%20ray%20articles.pdf>>
16. Claus Grupen, Astroparticle Physics, Springer 2005, **50**
17. Ralf Ulrich, On the measurement of the proton-air cross section using air shower data, Aspen 2007, **2**

18. Juan Cruz Moreno and Sergio Sciutto, Characterization of the atmospheric depth profile using the ground level temperature, **3, 4, 15**

(4.1) Claus Grupen, Astroparticle Physics, Springer 2005, **50**

(4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6) Juan Cruz Moreno and Sergio Sciutto, Characterization of the atmospheric depth profile using the ground level temperature, **1, 3**

## Dodatak 1.

Naredba za editiranje input kartice, input kartica, kod za pokretanje simulacija i naredba za izdvajanje potrebnih podataka (visina) i kreiranje dokumenta u kojemu su spremljeni ti podaci.

```
berta@berta-G501JW:~/corsika-76400/run$ gedit input01.txt
```

```
*INPUT
```

```
RUNNR 80          run number
EVTNR 1          number of first shower event
NSHOW 3000       number of showers to generate
PRMPAR 14       particle type of prim. particle
ESLOPE -2.7     slope of primary energy spectrum
ERANGE 80 80    energy range of primary particle
THETAP 0. 0.    range of zenith angle (degree)
PHIP -180. 180. range of azimuth angle (degree)
SEED 80 0 0     seed for 1. random number sequence
OBSLEV 220.E3   observation level (in cm)
FIXHEI 0. 0
MAGNET 30.65 23.64 magnetic field La Palma (Spain)
MAXPRT 3000    max. number of printed events
DIRECT ./      output directory
EXIT          terminates input
```

```
berta@berta-G501JW:~/corsika-76400/run$ ./corsika76400Linux_QGSJET_gheisha < input01.txt
> output01.txt
```

```
berta@berta-G501JW:~/corsika-76400/run$ gedit output01.txtberta@berta-G501JW:~/corsika-
76400/run$ grep -A1 "PRIMARY PARAMETERS" output01.txt | grep -v "FIRST
INTERACTION POINT" | awk '{print $6}' > FIP_proton_80GeV.txt
```

## Dodatak 2.

Python kod koji računa Gaussovu raspodjelu visina u ovisnosti o energiji i crta histogram.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.stats as sta

h = np.loadtxt("50GeV.dat")

mu, sigma = sta.norm.fit(h)
print("%.2f Å± %.2f km" %(mu,sigma))

plt.hist(h, 12)
plt.show()
```

### Dodatak 3.

Python kod koji crta graf visina prve interakcije primarnog protona u ovisnosti o energijama (Slika 5.1.).

```
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

import scipy.optimize as opt

def f(E, E0, H0):

    return H0*np.exp(-E/E0)

Em, hm = np.loadtxt("model.txt", usecols=(0,1), unpack=True)

Es, hs, ds = np.loadtxt("simulacije.txt", usecols=(0,1,2), unpack=True)

parametri, pogreske = opt.curve_fit(f, Es, hs, p0=[100.0,20.0], sigma=ds)

e0, h0 = parametri

Xfit = np.linspace(5.0, 0.5e6, 200)

Yfit = f(Xfit, e0, h0)

plt.errorbar(Es, hs, fmt="bo", yerr=ds, ecolor='blue', markersize=7, label=('simulacije'))

plt.semilogx(Em, hm, c='red', label=('model'))

plt.semilogx(Xfit, Yfit, c='green', ls='--', label=('fit'))

plt.xlabel('energija primarnog protona (GeV)',size=18)

plt.ylabel('visina prve interakcije (km)',size=18)

plt.xlim(1,1e6)

plt.legend(loc='upper left')

plt.grid(True)

plt.show()
```

## **Životopis**

Ivan Bertok rođen je 14. ožujka 1991. u Đakovu. U istom gradu završio je Opću gimnaziju, a potom upisao Preddiplomski studij fizike i informatike na Odjelu za fiziku. Preddiplomski studij završava 2015. godine. Iste godine upisuje Sveučilišni diplomski studij fizike i informatike.